

DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITE DE COOPERATION EN MATIERE DE BREVETS (PCT)

(51) Classification internationale des brevets ⁶ : F16C 39/06	A1	(11) Numéro de publication internationale: WO 95/23297 (43) Date de publication internationale: 31 août 1995 (31.08.95)
---	----	--

(21) Numéro de la demande internationale: PCT/FR95/00231

(22) Date de dépôt international: 28 février 1995 (28.02.95)

(30) Données relatives à la priorité:
94/02236 28 février 1994 (28.02.94) FR

(71) Déposant (pour tous les Etats désignés sauf US): SOCIETE DE MECANIQUE MAGNETIQUE [FR/FR]; 2, rue des Champs, Z.I. de Vernon Saint-Marcel, F-27950 Saint-Marcel (FR).

(72) Inventeurs; et

(75) Inventeurs/Déposants (US seulement): SCHROEDER, Ulrich [DE/FR]; 30, impasse de Clères, F-76130 Mont-Saint-Aignan (FR). BRUNET, Maurice [FR/FR]; 27, rue du Bout-aux-Roussel, F-27950 Sainte-Colombe (FR).

(74) Mandataires: THEVENET, Jean-Bruno etc.; Cabinet Beau de Loménie, 158, rue de l'Université, F-75340 Paris Cédex 07 (FR).

(81) Etats désignés: JP, US, brevet européen (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

Publiée

Avec rapport de recherche internationale.

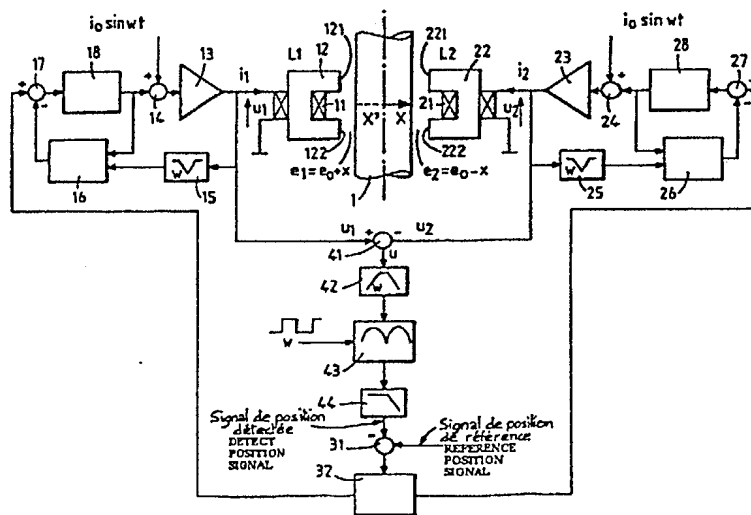
Avant l'expiration du délai prévu pour la modification des revendications, sera republiée si de telles modifications sont reçues.

(54) Title: AUTOMATIC POSITION-SENSING ACTIVE MAGNETIC BEARING

(54) Titre: PALIER MAGNETIQUE ACTIF A AUTO-DETECTION DE POSITION

(57) Abstract

An automatic position-sensing active magnetic bearing comprises first and second opposing electro-magnets arranged on either side of a ferromagnetic body (1) suspended without contact between said electromagnets. The bearing comprises inductive-type position sensors formed by the coils (11; 21) of the first and second electromagnets. Means (14; 24) are provided to inject simultaneously at the input of the power amplifiers (13; 23) supplying the windings (11; 21) of the first and second opposing electromagnets, in superposition to the main current from the control circuits (31, 32), a sinusoidal current $I_0 \sin \omega t$ having a constant amplitude I_0 of ω pulsation and an identical phase. Circuits (41 to 44) derive position information determining the intensity of the main current to be applied by the control circuits (31, 32) to the power amplifiers (13, 23) directly from voltages u_1, u_2 at the terminals of the excitation coils (11; 21), said voltages being measured according to the frequency of the sinusoidal current forming a ω pulsation carrier.



(57) Abrégé

Le palier magnétique actif à auto-détection de position comprend des premier et second électro-aimants antagonistes disposés de part et d'autre d'un corps ferromagnétique (1) suspendu sans contact entre ces électro-aimants. Le palier comprend des détecteurs de position du type inductif qui sont constitués directement par les bobines (11; 21) des premier et second électro-aimants. Des moyens (14; 24) sont prévus pour injecter simultanément à l'entrée d'amplificateurs de puissance (13; 23) alimentant les bobines (11; 21) des premier et second électro-aimants antagonistes, en superposition au courant principal issu de circuits d'asservissement (31, 32), un courant sinusoïdal $I_0 \sin \omega t$ d'amplitude constante I_0 , de pulsation ω et présentant une phase identique. Des circuits (41 à 44) permettent d'extraire l'information de position déterminant l'intensité du courant principal à appliquer par les circuits d'asservissement (31, 32) aux amplificateurs de puissance (13, 23) directement à partir des tensions u_1, u_2 aux bornes des bobines d'excitation (11; 21), mesurées à la fréquence du courant sinusoïdal constituant une porteuse de pulsation ω .

UNIQUEMENT A TITRE D'INFORMATION

Codes utilisés pour identifier les Etats parties au PCT, sur les pages de couverture des brochures publiant des demandes internationales en vertu du PCT.

AT	Autriche	GB	Royaume-Uni	MR	Mauritanie
AU	Australie	GE	Géorgie	MW	Malawi
BB	Barbade	GN	Guinée	NE	Niger
BE	Belgique	GR	Grèce	NL	Pays-Bas
BF	Burkina Faso	HU	Hongrie	NO	Norvège
BG	Bulgarie	IE	Irlande	NZ	Nouvelle-Zélande
BJ	Bénin	IT	Italie	PL	Pologne
BR	Brésil	JP	Japon	PT	Portugal
BY	Biélorus	KE	Kenya	RO	Roumanie
CA	Canada	KG	Kirghizistan	RU	Fédération de Russie
CF	République centrafricaine	KP	République populaire démocratique de Corée	SD	Soudan
CG	Congo	KR	République de Corée	SE	Suède
CH	Suisse	KZ	Kazakhstan	SI	Slovénie
CI	Côte d'Ivoire	LI	Liechtenstein	SK	Slovaquie
CM	Cameroun	LK	Sri Lanka	SN	Sénégal
CN	Chine	LU	Luxembourg	TD	Tchad
CS	Tchécoslovaquie	LV	Lettonie	TG	Togo
CZ	République tchèque	MC	Monaco	TJ	Tadjikistan
DE	Allemagne	MD	République de Moldova	TT	Trinité-et-Tobago
DK	Danemark	MG	Madagascar	UA	Ukraine
ES	Espagne	ML	Mali	US	Etats-Unis d'Amérique
FI	Finlande	MN	Mongolie	UZ	Ouzbékistan
FR	France			VN	Viet Nam
GA	Gabon				

Palier magnétique actif à auto-détection de position

La présente invention a pour objet un palier magnétique actif à auto-détection de position comprenant des premier et second électro-aimants antagonistes disposés de part et d'autre d'un corps ferromagnétique suspendu sans contact entre ces électro-aimants, les premier et second électro-aimants orientés selon un axe $X'X$ comprenant chacun d'une part un circuit magnétique définissant avec ledit corps un entrefer e_1 ; e_2 dont la valeur moyenne est égale à une valeur commune prédéterminée e_0 , et d'autre part une bobine d'excitation alimentée à partir d'un amplificateur de puissance dont le courant d'entrée est asservi en fonction de la position du corps par rapport aux circuits magnétiques des premier et second électro-aimants.

Dans les systèmes de palier magnétique actif les plus couramment utilisés, la position du corps suspendu, lequel corps peut être par exemple un rotor de machine ou un disque, est contrôlée en permanence à l'aide de détecteurs de position associés aux électro-aimants des paliers activateurs produisant les forces nécessaires pour le maintien du corps suspendu dans une position de travail donnée.

Le fait d'utiliser des détecteurs de position distincts des électro-aimants de support du corps suspendu renchérit considérablement le coût des machines, du fait des détecteurs proprement dits, de la connectique associée et des circuits électroniques pour les alimenter.

De plus, ces détecteurs ne peuvent être situés qu'à côté du palier, et de ce fait ne sont pas colinéaires en tant que point de détection par rapport au point de réaction. Cette délocalisation des détecteurs par rapport aux organes actuateurs peut induire des effets pervers quant au contrôle du rotor, lorsqu'il s'agit de prendre en compte les déformations du rotor induites lors de la rotation. Les détecteurs peuvent en effet se trouver alors à des noeuds de déformation alors que les électro-aimants activateurs seront plus proches de ventres de déformation, ou vice-versa. L'information fournie par les détecteurs ne sera alors pas le reflet fidèle de la réalité au niveau des paliers proprement dits.

On connaît encore, par le document WO-A-93/23683 un système de palier magnétique à auto-détection comprenant, pour une direction donnée, des bobines connectées en série dans lesquelles circulent à la fois un

courant destiné à stabiliser la position du corps mobile suspendu par le palier et un courant de détection. Un tel système de palier magnétique nécessite toutefois une pré-aimantation statorique réalisée avec des aimants permanents ainsi que des amplificateurs capables de fournir chacun des courants pouvant être à tour de rôle positifs et négatifs selon la position du corps mobile. La mise en oeuvre de moyens de pré-aimantation et d'amplificateurs linéaires complexes du type quatre quadrants rend la réalisation complexe et affecte la fiabilité de l'ensemble.

La présente invention vise à remédier aux divers inconvénients précités et à permettre d'assurer un asservissement fiable des électro-aimants d'un palier magnétique actif en fournissant de façon peu coûteuse une information de position de l'organe suspendu sans faire appel à des détecteurs de position séparés, tels que des détecteurs de type inductif, capacitif ou optique.

L'invention vise plus particulièrement à permettre d'effectuer, avec des paliers magnétiques actifs classiques utilisant, selon une direction donnée, uniquement deux électro-aimants en opposition produisant des forces d'attraction sur un corps mobile, une détection de position du type inductif sans qu'il soit nécessaire d'adjoindre au palier magnétique des bobines de détection distinctes des électro-aimants de palier eux-mêmes, ou des moyens de pré-aimantation.

L'invention vise à permettre la réalisation de paliers magnétiques actifs de relativement faible coût, en particulier pour des machines devant être produites en grande quantité, telles que par exemple des broches textiles, des broches d'usinage, des pompes à vide, des disques d'ordinateurs.

Ces buts sont atteints, conformément à l'invention, grâce à un palier magnétique actif à auto-détection de position comprenant des premier et second électro-aimants antagonistes disposés de part et d'autre d'un corps ferromagnétique suspendu sans contact entre ces électro-aimants, les premier et second électro-aimants orientés selon un axe $X'X$ comprenant chacun d'une part un circuit magnétique définissant avec ledit corps un entrefer dont la valeur moyenne est égale à une valeur commune prédéterminée e_0 , et d'autre part une bobine d'excitation alimentée à partir d'un amplificateur de puissance dont le courant d'entrée est asservi en fonction de la position du corps par rapport aux circuits magnétiques des

premier et second électro-aimants, caractérisé en ce que les amplificateurs de puissance sont constitués par des amplificateurs à commutation ; en ce que les bobines des premier et second électro-aimants constituent directement des détecteurs de position du type inductif ; en ce que des
5 moyens sont prévus pour injecter simultanément à l'entrée des amplificateurs de puissance alimentant les bobines des premier et second électro-aimants antagonistes, en superposition au courant principal issu des circuits d'asservissement, un courant sinusoïdal $I_0 \sin \omega t$ d'amplitude constante I_0 , de pulsation ω et présentant une phase identique, le rapport
10 entre la tension de détection fournie par un amplificateur à la pulsation ω et la tension destinée à fournir la force exercée par l'électro-aimant correspondant étant de l'ordre de 5 à 20 % et de préférence voisin de 10 %; et en ce qu'il comprend des circuits pour extraire l'information de position déterminant l'intensité du courant principal à appliquer par les circuits
15 d'asservissement aux amplificateurs de puissance directement à partir des tensions u_1, u_2 aux bornes des bobines d'excitation, mesurées à la fréquence du courant sinusoïdal constituant une porteuse de pulsation ω

Ainsi, conformément à l'invention, le palier magnétique, en plus de sa fonction palier proprement dite, est utilisé aussi comme détecteur de
20 position du type inductif, sans qu'il soit nécessaire d'adjoindre aucune bobine supplémentaire, la tension étant mesurée aux bornes de chaque bobine d'électro-aimant du palier dans des conditions pour lesquelles il y a quasi proportionnalité avec le déplacement du corps suspendu (rotor).

Le fait que le courant sinusoïdal d'amplitude I_0 constante et de
25 pulsation fixe ω soit injecté simultanément dans les deux électro-aimants antagonistes, avec une phase identique des deux côtés, évite de créer la moindre force de perturbation sur le rotor quand celui-ci est dans sa position nominale centrale, en particulier dans les cas où la fréquence du courant sinusoïdal constituant la porteuse devra être suffisamment basse
30 pour limiter la consommation de tension fournie par l'amplificateur de puissance alimentant le palier.

Dans tous les cas, le palier magnétique actif est caractérisé en ce que la fréquence du courant sinusoïdal injecté de pulsation ω est nettement supérieure à la bande passante désirée en boucle fermée des circuits
35 d'asservissement.

La mise en oeuvre d'amplificateurs de puissance à commutation permet de limiter les pertes et d'alimenter les bobines de palier avec une puissance réactive très importante.

Avantageusement, les amplificateurs à commutation présentent une
5 fréquence de commutation de l'ordre de plusieurs dizaines de kilohertz.

Selon une caractéristique importante de la présente invention, les tensions u_1 , u_2 aux bornes des bobines d'excitation mesurées à la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w sont comparées en mesure différentielle dans un comparateur fournissant une tension u proportionnelle
10 au déplacement du corps par rapport à sa position d'équilibre.

La mesure différentielle permet d'éliminer les deux termes constants de la forme $U_0 = L_0 I_0 w$, dûs à l'inductance L_0 des bobines d'électro-aimants relative à l'entrefer moyen e_0 , et les termes constants $U_s I_0 w$ dûs à l'inductance de fuite L_s des bobines d'électro-aimants relative aux fuites
15 magnétiques.

De façon plus particulière, les circuits d'extraction de l'information de position comprennent un filtre passe-bande centré sur la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w et présentant une demi-largeur adaptée à la bande passante désirée des circuits d'asservissement.

20 Les circuits d'extraction de l'information de position comprennent un démodulateur synchrone placé en sortie du filtre passe bande et piloté par la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w .

Les circuits d'extraction de l'information de position comprennent un filtre du deuxième ordre pour filtrer la fréquence correspondant à une pulsation $2w$ créée par la démodulation double alternance au sein du
25 démodulateur synchrone.

Avantageusement, les fréquences de commutation des amplificateurs de puissance à commutation et la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w sont synchronisées. Ceci permet d'éviter les
30 problèmes de bruit dûs aux battements de fréquences.

Les électro-aimants sont dimensionnés de telle façon que la force maximale demandée à ces électro-aimants est obtenue pour une induction magnétique située hors de la zone de saturation du matériau utilisé pour constituer les circuits magnétiques des électro-aimants.

Dès lors que le trajet dans les circuits magnétiques des électro-aimants de palier reste négligeable et reste quasiment constant quelle que soit la force demandée aux électro-aimants, la mesure de l'inductance des bobines des électro-aimants de palier peut bien rester inversement proportionnelle à l'entrefer.

Les circuits magnétiques des électro-aimants sont réalisés en un matériau à perméabilité peu variable en fonction de l'induction magnétique, en particulier dans la zone de fonctionnement des électro-aimants située loin des zones de saturation.

Les circuits d'asservissement alimentant les amplificateurs de puissance comprennent un comparateur entre le signal de position issu des circuits d'extraction de l'information de position et une valeur de consigne de position, et au moins des circuits comprenant un réseau correcteur de traitement de signal et un linéarisateur du courant de repos.

Les circuits d'asservissement peuvent en outre comprendre des boucles de régulation de flux interposées entre d'une part les circuits comprenant un réseau correcteur et un linéarisateur, et d'autre part des circuits additionneurs constituant lesdits moyens d'injection recevant ledit courant sinusoïdal $I_0 \sin \omega t$ de pulsation ω .

Dans ce cas, à titre d'exemple, chaque boucle de régulation du flux comprend un filtre réjecteur centré sur une fréquence de pulsation ω et recevant en entrée le signal de tension de sortie de l'amplificateur correspondant, un circuit de calcul de flux correspondant, un circuit de calcul de flux auquel sont appliqués d'une part le signal de sortie du filtre réjecteur correspondant et d'autre part le signal de sortie d'un régulateur de flux également appliqué sur une entrée du circuit additionneur correspondant et un circuit soustracteur qui soustrait au signal issu des circuits comprenant un réseau correcteur et un linéarisateur, le signal issu du circuit de calcul de flux correspondant et délivre un signal de sortie à l'entrée du circuit régulateur de flux correspondant.

Naturellement, l'invention couvre des paliers magnétiques actifs comprenant en particulier deux systèmes de palier magnétique actif du type défini ci-dessus orientés selon deux directions XX' , YY' perpendiculaires entre elles.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description suivante de modes particuliers de réalisation de l'invention, donnés à titre d'exemples non limitatifs, en référence au dessin annexé sur lequel :

5 - la figure 1 est un schéma-bloc d'un système de palier magnétique actif selon l'invention incorporant un système de détection de position utilisant les électro-aimants de palier, et

10 - la figure 2 est une courbe montrant l'allure du signal de position délivré par le système de détection de position, en fonction des variations de l'entrefer des électro-aimants.

On voit sur la figure 1 un rotor 1 suspendu par deux électro-aimants de palier antagonistes orientés selon un axe XX' perpendiculaire à l'axe du rotor 1. Chaque électro-aimant comprend un circuit magnétique 12 resp. 22 en matériau ferromagnétique présentant en coupe la forme d'un U avec deux
15 pièces polaires 121, 122 resp 221, 222 orientées vers le rotor 1, lui-même en matériau ferromagnétique ou revêtu d'une armature en matériau ferromagnétique. Les pièces polaires 121, 122 définissant chacune avec le rotor 1 un entrefer $e_1 = e_0 + x$ où e_0 représente l'entrefer moyen lorsque le rotor est dans sa position d'équilibre et x représente la variation de l'entrefer
20 par rapport à la valeur moyenne e_0 , engendrée par un déplacement du rotor 1 dans la direction radiale $X'X$. Les pièces polaires 221 et 222 sont symétriques des pièces polaires 121, 122 par rapport à l'axe du rotor 1 lorsque le rotor 1 est dans sa position d'équilibre, de sorte que les pièces polaires 221, 222 définissent chacune avec le rotor 1 un entrefer $e_2 = e_0 - x$
25 où e_0 représente l'entrefer moyen lorsque le rotor 1 est dans sa position d'équilibre et x représente la variation de l'entrefer par rapport à la valeur moyenne e_0 engendrée par un déplacement du rotor 1 dans la direction radiale $X'X$. Ainsi, une valeur de x positive signifiera un déplacement du rotor 1 vers le circuit magnétique 22 tandis qu'une valeur de x négative
30 signifiera un déplacement du rotor 1 vers le circuit magnétique 12.

Chaque électro-aimant comprend par ailleurs une bobine d'excitation 11 resp 21 qui est alimentée à partir d'un amplificateur de puissance 13 resp 23, qui est de préférence un amplificateur à commutation en mode courant. Chaque amplificateur de puissance 13 resp 23 reçoit en
35 entrée un courant principal d'entrée qui permet de fournir en sortie aux

bobines 11, 21 l'énergie nécessaire au maintien du rotor 1 dans sa position d'équilibre prédéterminée. Le courant principal d'entrée est issu de circuits d'asservissement ayant eux-mêmes reçu des informations sur la position réelle du rotor et prenant en compte une position de consigne. Chaque amplificateur 13 resp 23 délivre un courant unidirectionnel et indépendant du courant délivré par l'autre amplificateur 23 resp 13, les électro-aimants alimentés de façon indépendante par les amplificateurs 13, 23 étant montés en opposition et produisant des forces d'attraction sur le corps mobile 1 de part et d'autre de celui-ci selon l'axe X'X.

Pour permettre d'obtenir une information de position sans utiliser de détecteur de position distinct des électro-aimants de palier, des circuits additionneurs 14, 24 permettent d'injecter simultanément à l'entrée des amplificateurs de puissance 13, 23, en superposition au courant principal issu des circuits d'asservissement, un courant sinusoïdal de la forme $I_0 \sin \omega t$ d'amplitude constante I_0 , de pulsation ω et présentant une phase identique.

En sortie des amplificateurs de puissance 13, 23, il est donc injecté, en superposition au courant destiné à fournir la force portante des électro-aimants, des courants i_1, i_2 de la forme : $i_1 = i_2 = I_0 \sin \omega t$.

Les entrefers e_1 et e_2 entre le rotor 1 et les pôles 121, 122 resp 221, 222 sont de la forme indiquée plus haut, à savoir :

$$e_1 = e_0 + x$$

$$e_2 = e_0 - x$$

Les inductances des électro-aimants 11, 12 resp 21, 22 sont respectivement de la forme :

$$L_1 = L_s + L_0 / (1 + x/e_0)$$

$$L_2 = L_s + L_0 / (1 - x/e_0)$$

où L_s représente l'inductance de fuite des électro-aimants 11, 12 resp 21, 22 relative aux fuites magnétiques, et

L_0 représente l'inductance des électro-aimants 11, 12 resp 21, 22 relative à l'entrefer moyen e_0 .

Les tensions 41 et 42 aux bornes d'entrée des bobines 11 et 21, dues aux courants injectés i_1 et i_2 , sont de la forme :

$$u_1 = - \omega I_0 L_1 \cos \omega t$$

$$u_2 = - \omega I_0 L_2 \cos \omega t$$

Lorsque l'on effectue dans un comparateur 41 la différence des tensions u_1 et u_2 , on obtient des expressions de la forme :

$$\begin{aligned} u &= u_1 - u_2 = -wI_0 \cos wt (L_1 - L_2) \\ &= (wI_0 \cos wt) \cdot 2 L_0 \cdot (x/e_0) / (1 - (x/e_0)^2) \\ &= A \cdot f(x/e_0) \end{aligned}$$

où $A = (wI_0 \cos wt) 2 L_0 = \text{constante}$

et $f(x/e_0) = (x/e_0) / (1 - (x/e_0)^2)$

On voit que la comparaison en mesure différentielle des tensions u_1 et u_2 permet d'éliminer les termes constants dûs à l'inductance L_0 relative à l'entrefer moyen e_0 et à l'inductance de fuite L_s relative aux fuites magnétiques de sorte que la tension résultante est proportionnelle au déplacement x du rotor 1.

La tension u est filtrée dans un filtre passe-bande 42 centré sur une fréquence correspondant à la pulsation w , et présentant une demi-largeur adaptée à la bande passante désirée de l'asservissement du système à paliers magnétiques.

La tension u est ensuite démodulée dans un démodulateur 43 synchrone piloté par une fréquence correspondant à la pulsation w .

La sortie du démodulateur synchrone 43 fournit, après passage dans un filtre du deuxième ordre 44 assurant le filtrage de la fréquence créée par la démodulation double alternance, un signal représentatif de la position réelle du rotor selon l'axe $X'X$, au niveau des électro-aimants de palier.

Ce signal est de la forme :

$$u(x) = k (x/e_0) / (1 - (x/e_0)^2)$$

La figure 2 montre la linéarité du signal de position $u(x)$ obtenu, en fonction du rapport x/e_0 entre le déplacement du rotor x et l'entrefer moyen e_0 .

On constate que cette linéarité est très bonne pour la plage de travail habituelle du palier.

On peut ainsi déduire un signal de position du rotor à partir de la mesure de l'inductance de deux électro-aimants antagonistes de palier, sans adjoindre de détecteur distinct des électro-aimants de palier et sans créer la moindre force de perturbation sur le rotor quand celui-ci est dans sa position nominale centrale, dès lors que le courant injecté de la forme $I_0 \sin wt$ est injecté simultanément dans les deux électro-aimants antagonistes,

avec une phase identique des deux côtés, ce qui permet notamment une comparaison en mesure différentielle.

Les courants de repos variables injectés dans les amplificateurs représentent une faible valeur par rapport aux courants d'asservissement destinés à fournir la force exercée par les électro-aimants, et les pertes rotoriques correspondantes peuvent rester extrêmement faibles.

La fréquence du courant sinusoïdal injecté, correspondant à la pulsation w est nettement supérieure à la bande passante en boucle fermée du système, mais doit de préférence rester suffisamment basse pour limiter la consommation de tension fournie par les amplificateurs de puissance alimentant le palier.

Comme cela a déjà été indiqué plus haut, les amplificateurs 13, 23 sont constitués avantageusement par des amplificateurs à commutation, de type connu en soi, pour limiter les pertes. Ces amplificateurs à commutation peuvent présenter une fréquence de commutation qui peut être de l'ordre de par exemple 50 kHz ou même être supérieure à cette valeur et peut égaler ou dépasser 100 kHz. Toutefois, il est préférable de synchroniser les fréquences de commutation des amplificateurs 13, 23 et la fréquence de la porteuse injectée de pulsation w afin d'éviter les problèmes de bruit dus aux battements de fréquence.

A titre d'exemple, la fréquence de commutation peut être de l'ordre de vingt fois la fréquence de détection correspondant à la pulsation w , et la fréquence de détection peut elle-même être de l'ordre de vingt fois la fréquence d'asservissement.

D'une manière générale, le palier est dimensionné de telle sorte que la force maximale demandée au palier est obtenue pour une induction située hors de la zone de saturation du matériau utilisé pour le palier, et les circuits magnétiques 12, 22 du palier sont réalisés en matériau à perméabilité peu variable en fonction de l'induction magnétique, en particulier dans la zone de fonctionnement de l'électro-aimant, c'est-à-dire de sa zone de saturation.

On notera que le système de palier magnétique actif à auto-détection n'implique aucune pré-aimantation par aimants permanents, ce qui simplifie la réalisation et accroît la robustesse et la fiabilité.

Le signal de position issu du filtre 44 peut ensuite être utilisé dans des circuits d'asservissement de façon traditionnelle, comme si ce signal avait été obtenu par un détecteur indépendant, mais avec la garantie que l'information correspond exactement à la localisation des électro-aimants de palier.

Le signal de position peut ainsi être comparé dans un comparateur 31 avec une valeur de consigne de position et le signal issu du comparateur 31 est appliqué à des circuits 32 pouvant comprendre un réseau correcteur de traitement du signal, par exemple de type PID (proportionnel-Integral-Dérivé) et un linéarisateur de courant de repos. Le signal issu des circuits 32 peut ensuite être appliqué, avec des signes différents, sur une des entrées de chacun des circuits additionneurs 14, 24 placés à l'entrée des amplificateurs 13, 23.

Avantageusement, les circuits d'asservissement peuvent comprendre en outre des boucles de régulation de flux interposés entre d'une part les circuits 32 et d'autre part les circuits additionneurs 14, 24.

Chaque boucle de régulation de flux peut comprendre un filtre réjecteur 15; 25 centré sur une fréquence de pulsation w et recevant en entrée le signal de tension de sortie de l'amplificateur correspondant 13; 23, un circuit de calcul de flux 16; 26 auquel sont appliqués d'une part le signal de sortie du filtre réjecteur correspondant 15; 25 et d'autre part le signal de sortie d'un régulateur de flux 18; 28 également appliqué sur une entrée du circuit additionneur correspondant 14; 24 et un circuit soustracteur 17; 27 qui soustrait au signal issu des circuits 32, le signal issu du circuit de calcul de flux correspondant 16; 26 et délivre un signal de sortie à l'entrée du circuit régulateur de flux correspondant 18; 28.

L'utilisation d'une boucle de flux en exploitant les tensions de sortie des amplificateurs, c'est-à-dire le signal également utilisé pour la détection, assure un meilleur comportement dynamique, même avec une bande passante du système de détection de position réduite.

Naturellement, il est possible d'incorporer, par exemple dans un palier magnétique actif radial, deux systèmes de palier magnétique actif selon l'invention comportant chacun une paire d'électro-aimants antagonistes, les deux paires d'électro-aimants étant orientées selon deux directions XX' , YY' perpendiculaires entre elles.

Le palier magnétique actif selon l'invention peut aussi être utilisé seul, par exemple en tant que palier axial coopérant avec les deux faces d'un disque. Dans ce cas, les électro-aimants subissent une rotation de 90° par rapport au cas de la figure 1, les pièces polaires 121, 122, 221, 222 devenant

5 parallèles à l'axe du disque.

REVENDECATIONS

1. Palier magnétique actif à auto-détection de position comprenant des premier et second électro-aimants antagonistes disposés de part et d'autre d'un corps ferromagnétique (1) suspendu sans contact entre ces électro-aimants, les premier et second électro-aimants orientés selon un axe X'X comprenant chacun d'une part un circuit magnétique (12; 22) définissant avec ledit corps un entrefer (e_1 ; e_2) dont la valeur moyenne est égale à une valeur commune prédéterminée e_0 , et d'autre part une bobine d'excitation (11; 21) alimentée à partir d'un amplificateur de puissance (13; 23) dont le courant d'entrée est asservi en fonction de la position du corps (1) par rapport aux circuits magnétiques (12; 22) des premier et second électro-aimants,
- caractérisé en ce que les amplificateurs de puissance (13, 23) sont constitués par des amplificateurs à commutation ; en ce que les bobines (11; 21) des premier et second électro-aimants constituent directement des détecteurs de position du type inductif ; en ce que des moyens (14; 24) sont prévus pour injecter simultanément à l'entrée des amplificateurs de puissance (13; 23) alimentant les bobines (11; 21) des premier et second électro-aimants antagonistes, en superposition au courant principal issu des circuits d'asservissement (31, 32), un courant sinusoïdal $I_0 \sin wt$ d'amplitude constante I_0 , de pulsation w et présentant une phase identique, le rapport entre la tension de détection fournie par un amplificateur (13, 23) à la pulsation w et la tension destinée à fournir la force exercée par l'électro-aimant correspondant étant de l'ordre de 5 à 20 % et de préférence voisin de 10 %; et en ce qu'il comprend des circuits (41 à 44) pour extraire l'information de position déterminant l'intensité du courant principal à appliquer par les circuits d'asservissement (31, 32) aux amplificateurs de puissance (13, 23) directement à partir des tensions u_1 , u_2 aux bornes des bobines d'excitation (11; 21), mesurées à la fréquence du courant sinusoïdal constituant une porteuse de pulsation w .
2. Palier magnétique actif selon la revendication 1, caractérisé en ce que la fréquence du courant sinusoïdal injecté de pulsation w est nettement supérieure à la bande passante désirée en boucle fermée des circuits d'asservissement.

3. Palier magnétique actif selon la revendication 1 ou la revendication 2, caractérisé en ce que les amplificateurs à commutation (13, 23) présentent une fréquence de commutation de l'ordre de plusieurs dizaines de kilohertz.
4. Palier magnétique actif selon l'une quelconque des revendications 1
5 à 3, caractérisé en ce que les fréquences de commutation des amplificateurs de puissance à commutation (13, 23) et la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w sont synchronisées.
5. Palier magnétique actif selon l'une quelconque des revendications 1
à 4, caractérisé en ce que les tensions u_1 , u_2 aux bornes des bobines
10 d'excitation (11, 21) mesurées à la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w sont comparées en mesure différentielle dans un comparateur (41) fournissant une tension u proportionnelle au déplacement du corps (1) par rapport à sa position d'équilibre.
6. Palier magnétique actif selon l'une quelconque des revendications 1
15 à 5, caractérisé en ce que les circuits (41 à 44) d'extraction de l'information de position comprennent un filtre passe-bande (42) centré sur la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w et présentant une demi-largeur adaptée à la bande passante désirée des circuits d'asservissement (31, 32).
7. Palier magnétique actif selon la revendication 6, caractérisé en ce
20 que les circuits (41 à 44) d'extraction de l'information de position comprennent un démodulateur synchrone (43) placé en sortie du filtre passe bande (42) et piloté par la fréquence du courant sinusoïdal de pulsation w .
8. Palier magnétique selon la revendication 7, caractérisé en ce que les
circuits (41 à 44) d'extraction de l'information de position comprennent un
25 filtre du deuxième ordre (44) pour filtrer la fréquence correspondant à une pulsation $2w$ créée par la démodulation double alternance au sein du démodulateur synchrone (43).
9. Palier magnétique actif selon l'une quelconque des revendications 1
à 8, caractérisé en ce que les électro-aimants sont dimensionnés de telle
30 façon que la force maximale demandée à ces électro-aimants est obtenue pour une induction magnétique située hors de la zone de saturation du matériau utilisé pour constituer les circuits magnétiques (12; 22) des électro-aimants.
10. Palier magnétique actif selon la revendication 9, caractérisé en ce
35 que les circuits magnétiques (12; 22) des électro-aimants sont réalisés en un

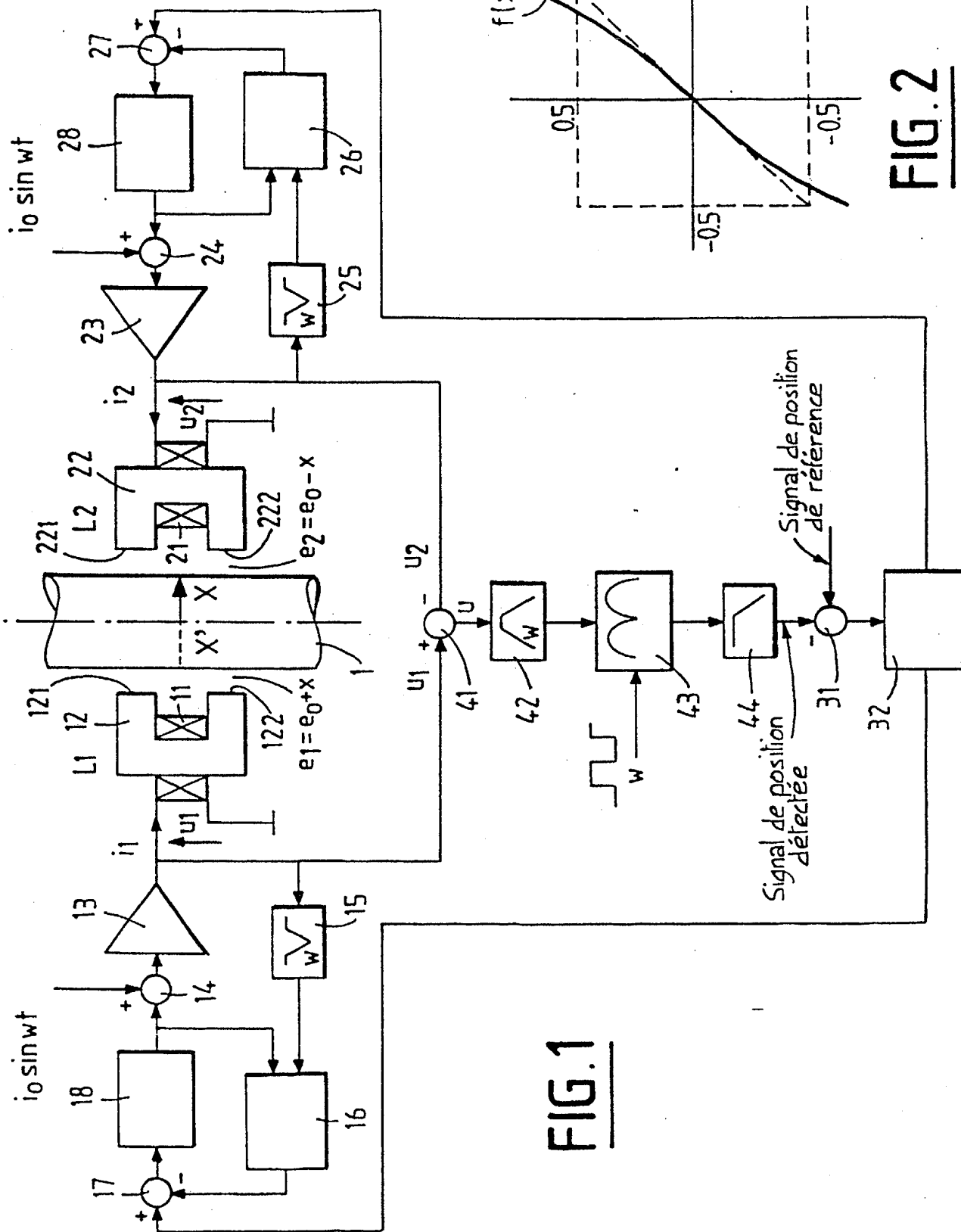
matériau à perméabilité peu variable en fonction de l'induction magnétique, en particulier dans la zone de fonctionnement des électro-aimants située loin des zones de saturation.

11. Palier magnétique actif selon l'une quelconque des revendications 1 à 10, caractérisé en ce que les circuits d'asservissement (31, 32) alimentant les amplificateurs de puissance (13; 23) comprennent un comparateur (31) entre le signal de position issu des circuits (41 à 44) d'extraction de l'information de position et une valeur de consigne de position, et au moins des circuits (32) comprenant un réseau correcteur de traitement de signal et un linéarisateur du courant de repos.

12. Palier magnétique actif selon la revendication 11, caractérisé en ce que les circuits d'asservissement comprennent en outre des boucles de régulation de flux interposées entre d'une part les circuits (32) comprenant un réseau correcteur et un linéarisateur, et d'autre part des circuits additionneurs (14, 24) constituant lesdits moyens d'injection recevant ledit courant sinusoïdal $I_0 \sin wt$ de pulsation w .

13. Palier magnétique actif selon la revendication 12, caractérisé en ce que chaque boucle de régulation du flux comprend un filtre réjecteur (15; 25) centré sur une fréquence de pulsation w et recevant en entrée le signal de tension de sortie de l'amplificateur correspondant (13; 23), un circuit de calcul de flux (16; 26) auquel sont appliqués d'une part le signal de sortie du filtre réjecteur correspondant (15; 25) et d'autre part le signal de sortie d'un régulateur de flux (18; 28) également appliqué sur une entrée du circuit additionneur correspondant (14; 24) et un circuit soustracteur (17; 27) qui soustrait au signal issu des circuits (32) comprenant un réseau correcteur et un linéarisateur, le signal issu du circuit de calcul de flux correspondant (16; 26) et délivre un signal de sortie à l'entrée du circuit régulateur de flux correspondant (18; 28).

14. Palier magnétique actif comprenant deux systèmes de palier magnétique actif selon l'une quelconque des revendications 1 à 13, orientés selon deux directions XX' , YY' perpendiculaires entre elles.



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR 95/00231

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 6 F16C39/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC 6 F16C.

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO,A,93 23683 (FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH) 25 November 1993 cited in the application see the whole document ---	1,2,5-7, 14
A	FR,A,2 322 294 (PADANA AG) 25 March 1977 page 2, line 13 - page 3, line 18; page 5, line 1 - page 6, line 24; page 7, line 38 - page 10, line 29; figures 1,3,4 ---	1,2,5-7, 14
A	US,A,3 508 444 (SITOMER ET AL.) 28 April 1970 column 2, line 43 - column 3, line 10; column 4, line 50 - column 5, line 65; figure 1 --- -/--	1

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

- *A* document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- *E* earlier document but published on or after the international filing date
- *L* document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- *O* document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- *P* document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

T later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

X document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

Y document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

& document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

8 June 1995

Date of mailing of the international search report

03.07.95

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+31-70) 340-3016

Authorized officer

BEITNER M.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/FR 95/00231

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE,A,26 56 469 (LICENTIA PATENT-VERWALTUNGS-GMBH) 15 June 1978 page 3, line 9 - page 7, line 22; figures 1, 2 ---	1,2,5,6, 9
A	DE,A,39 37 687 (MECOS TRAXLER AG) 23 May 1990 abstract; column 1, line 9 - column 3, line 8; figures 1 - 6 ---	1,11
A	EP,A,0 473 232 (N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN) 4 March 1992 abstract; column 6, line 15 - column 9, line 51; figure 4 -----	11,12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

Interr. Appl. Application No

PCT/FR 95/00231

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO-A-9323683	25-11-93	DE-A- 4216481 EP-A- 0640190	02-12-93 01-03-95
FR-A-2322294	25-03-77	DE-A- 2537597 GB-A- 1549324 JP-A- 52037648	03-03-77 01-08-79 23-03-77
US-A-3508444	28-04-70	NONE	
DE-A-2656469	15-06-78	NONE	
DE-A-3937687	23-05-90	CH-A- 678090	31-07-91
EP-A-0473232	04-03-92	NL-A- 9001908 JP-A- 4245406 US-A- 5227948	16-03-92 02-09-92 13-07-93

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dema Internationale No
PCT/FR 95/00231

A. CLASSEMENT DE L'OBJET DE LA DEMANDE

CIB 6 F16C39/06

Selon la classification internationale des brevets (CIB) ou à la fois selon la classification nationale et la CIB

B. DOMAINES SUR LESQUELS LA RECHERCHE A PORTE

Documentation minimale consultée (système de classification suivi des symboles de classement)

CIB 6 F16C

Documentation consultée autre que la documentation minimale dans la mesure où ces documents relèvent des domaines sur lesquels a porté la recherche

Base de données électronique consultée au cours de la recherche internationale (nom de la base de données, et si cela est réalisable, termes de recherche utilisés)

C. DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS

Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
X	WO,A,93 23683 (FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH GMBH) 25 Novembre 1993 cité dans la demande * entier document *	1,2,5-7, 14
A	FR,A,2 322 294 (PADANA AG) 25 Mars 1977 * page 2, ligne 13 - page 3, ligne 18; page 5, ligne 1 - page 6, ligne 24; page 7, ligne 38 - page 10, ligne 29; figures 1, 3, 4 *	1,2,5-7, 14
A	US,A,3 508 444 (SITOMER ET AL.) 28 Avril 1970 * colonne 2, ligne 43 - colonne 3, ligne 10; colonne 4, ligne 50 - colonne 5, ligne 65; figure 1 *	1

-/-

☒ Voir la suite du cadre C pour la fin de la liste des documents

☒ Les documents de familles de brevets sont indiqués en annexe

* Catégories spéciales de documents cités:

"A" document définissant l'état général de la technique, non considéré comme particulièrement pertinent

"E" document antérieur, mais publié à la date de dépôt international ou après cette date

"L" document pouvant jeter un doute sur une revendication de priorité ou cité pour déterminer la date de publication d'une autre citation ou pour une raison spéciale (telle qu'indiquée)

"O" document se référant à une divulgation orale, à un usage, à une exposition ou tous autres moyens

"P" document publié avant la date de dépôt international, mais postérieurement à la date de priorité revendiquée

"T" document ultérieur publié après la date de dépôt international ou la date de priorité et n'appartenant pas à l'état de la technique pertinent, mais cité pour comprendre le principe ou la théorie constituant la base de l'invention

"X" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme nouvelle ou comme impliquant une activité inventive par rapport au document considéré isolément

"Y" document particulièrement pertinent; l'invention revendiquée ne peut être considérée comme impliquant une activité inventive lorsque le document est associé à un ou plusieurs autres documents de même nature, cette combinaison étant évidente pour une personne du métier

"&" document qui fait partie de la même famille de brevets

Date à laquelle la recherche internationale a été effectivement achevée

8 Juin 1995

Date d'expédition du présent rapport de recherche internationale

03.07.95

Nom et adresse postale de l'administration chargée de la recherche internationale

Office Européen des Brevets, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax (+ 31-70) 340-3016

Fonctionnaire autorisé

BEITNER M.

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Dem. Internationale No
PCT/FR 95/00231

C.(suite) DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		
Catégorie *	Identification des documents cités, avec, le cas échéant, l'indication des passages pertinents	no. des revendications visées
A	DE,A,26 56 469 (LICENTIA PATENT-VERWALTUNGS-GMBH) 15 Juin 1978 * page 3, ligne 9 - page 7, ligne 22; figures 1, 2 *	1,2,5,6, 9
A	DE,A,39 37 687 (MECOS TRAXLER AG) 23 Mai 1990 * abrégé; colonne 1, ligne 9 - colonne 3, ligne 8; figures 1 - 6 *	1,11
A	EP,A,0 473 232 (N.V. PHILIPS' GLOEILAMPENFABRIEKEN) 4 Mars 1992 * abrégé; colonne 6, ligne 15 - colonne 9, ligne 51; figure 4 *	11,12

RAPPORT DE RECHERCHE INTERNATIONALE

Renseignements relatifs aux membres de familles de brevets

Dema Internationale No
PCT/FR 95/00231

Document brevet cité au rapport de recherche	Date de publication	Membre(s) de la famille de brevet(s)	Date de publication
WO-A-9323683	25-11-93	DE-A- 4216481 EP-A- 0640190	02-12-93 01-03-95
FR-A-2322294	25-03-77	DE-A- 2537597 GB-A- 1549324 JP-A- 52037648	03-03-77 01-08-79 23-03-77
US-A-3508444	28-04-70	AUCUN	
DE-A-2656469	15-06-78	AUCUN	
DE-A-3937687	23-05-90	CH-A- 678090	31-07-91
EP-A-0473232	04-03-92	NL-A- 9001908 JP-A- 4245406 US-A- 5227948	16-03-92 02-09-92 13-07-93